Revista Digital Universitaria
10 de octubre 2009 • Volumen 10 Número 10 • ISSN: 1067-6079

ARTICULO

EL SOL, NUESTRA ESTRELLA

Xochitl Blanco-Cano
Investigadora titular.
Departamento de física espacial.
Instituto de Geofísica.
UNAM.
xbc@geofisica.unam.mx

Primož Kajdic
Posdoc.
Departamento de física espacial.
Instituto de Geofísica.
UNAM.
primoz@geofisica.unam.mx

© Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

http://www.revista.unam.mx/vol.10/num10/art67/int67.htm

El Sol, nuestra estrella

Resumen

En este artículo estamos describiendo el Sol, su estructura, los fenómenos relacionados con él y el impacto que tiene sobre los demás cuerpos del Sistema Solar. El hecho que el Sol es la estrella más cercana a nosotros, lo hace también la más estudiada. En las última dos décadas se han lanzado numerosas misiones espaciales que día a día nos proveen con una enorme cantidad de datos observacionales. También se han desarrollado modelos teóricos muy avanzados para explicar el comportamiento de nuestra estrella. Casi diario se descubren nuevos fenómenos fascinantes que suceden en el Sol, lo cual representa un gran reto para el ejército de científicos de todo el mundo que estudian a nuestra estrella y la influencia que esta tiene en los planetas como la Tierra.

Palabras claves

Sol, sistema solar, física espacial, astronomía, observatorios solares

Abstract

This paper describes the Sun structure and phenomena related with it, as well as the impact that our star has on other bodies of the solar system. Being the closest star to us, makes the Sun also the most studied one. In the last two decades a considerable number of space missions have been launched into space to provide continuous real-time observations of the Sun and space. In addition, a number of theoretical models have been developed to understand the behavior of our star. Almost everyday new fascinating phenomena related to the Sun are being discovered. Understanding these phenomena is a great challenge for the army of scientists around the world who study our star and its influence on planets, in particular on Earth.

Keywoords

Sun, Solar System, space physics, astronomy, solar observatories

Introducción

El Sol es el objeto central de nuestro sistema solar. Se ha formado hace 6.5 mil millones de años de una enorme nube interestelar de gas frío. Contiene prácticamente toda (99.8 %) la masa del sistema solar y es más de 333,000 veces más masivo que la Tierra. Su radio, 700,000 km, es 109 veces más grande que el radio de la Tierra. Así que se necesitarían 1, 300, 000 planetas Tierra para llenarlo.

El Sol está compuesto principalmente de dos elementos – hidrógeno y helio. Sus abundancias han

© Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

10 de octubre 2009 • Volumen 10 Número 10 • ISSN: 1067-6079

cambiado a lo largo de su vida, por lo que hoy el hidrógeno y el helio representan el 74.9 % y el 23.8 %, respectivamente de su masa total. El oxígeno sólo contribuye con el 1 %, el carbono con el 0.3 % y el neón y el hierro con el 0.2 %.

La distancia que nos separa del Sol equivale a un poco más de ocho minutos de luz. Esto significa que la luz, viajando a una velocidad de 300, 000 km/s, se tarda más de ocho minutos en recorrer la distancia que nos separa del Sol. Es por eso, que cualquier cambio que sucede en la superficie solar, lo podemos ver con un retraso de ocho minutos. Esta distancia, conocida como unidad astronómica (u.a.), se traduce a 150 millones de kilómetros, lo cual es 390 veces más que la distancia a la Luna y 3, 750 veces mayor que el largo del ecuador.

La temperatura en el Sol es tan alta, que el material se encuentra en estado plasma, esto es, separado en iones y electrones. A este estado se le conoce comúnmente como el cuarto estado de la materia, debido a la carga eléctrica de las partículas. El material de un plasma interactúa con campos eléctricos y magnéticos y se comporta de manera muy diferente a un gas neutro. El 99% de la materia visible en el universo está en estado plasma, por lo que al estudiar a nuestra estrella podemos aprender sobre fenómenos que ocurren comúnmente en otros entornos

Interior solar

Si pudiéramos atravesar el Sol, veríamos que las condiciones físicas, como la temperatura, la presión, la densidad y la composición química, dependen mucho de que tal lejos del centro del Sol las examinamos. Según estas características, el Sol está dividido en capas, de las cuales tres forman el interior solar: núcleo, zona radiativa y zona convectiva.

Núcleo

El núcleo es la parte más interna del Sol. Se extiende desde su centro hasta el radio que equivale a un cuarto del radio solar. Esto significa que el volumen del núcleo representa apenas el 1.5 % del volumen del Sol, pero, debido a su alta densidad, que en su centro alcanza 150 g/cm^3 o 150 veces la densidad del agua, contiene casi la mitad de la masa solar. El núcleo es también la parte más caliente. La temperatura en el centro es de 15.7 millones de grados Kelvin (K). En el núcleo se produce la mayor parte de energía solar a través de reacciones nucleares. Por medio de ellas el núcleo del Sol cambia su estructura química. Estas reacciones transforman elementos químicos ligeros en elementos más pesados. La reacción nuclear más común es la que transforma hidrógeno (H) en helio (He). Sucede que en el núcleo solar, debido a su alta temperatura, los átomos ya no tienen sus electrones. El gas ahí está compuesto de los núcleos atómicos y electrones sueltos que se mueven con velocidades muy altas. Debido a la alta densidad, en un volumen pequeño se encuentran muchos núcleos y estos suelen chocar entre ellos. La mayoría de ellos son núcleos de hidrógeno, llamados protones. Se necesitan cuatro protones para producir un núcleo de helio. éste pesa casi igual que cuatro protones, pero es más ligero. Esto se debe en parte a que el 0.7 % de la masa de protones se convierte en energía que después será radiada como luz visible o invisible. Esta energía no se sale del Sol de inmediato, sino que está siendo absorbida y reemitida en el interior solar por diferentes partículas, así que se tarda hasta un millón de años en salirse del Sol. Cada segundo $4.4x10^9$ kg (4.4 millones de toneladas) de materia son convertidos en $4x10^{26}$ Joules de energía. Debido a reacciones nucleares la composición química del núcleo cambia, por lo cual es diferente que el promedio del Sol. El hidrógeno representa solamente el 40 % de la masa total del núcleo, mientras que el helio es casi el 60 %.

© Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

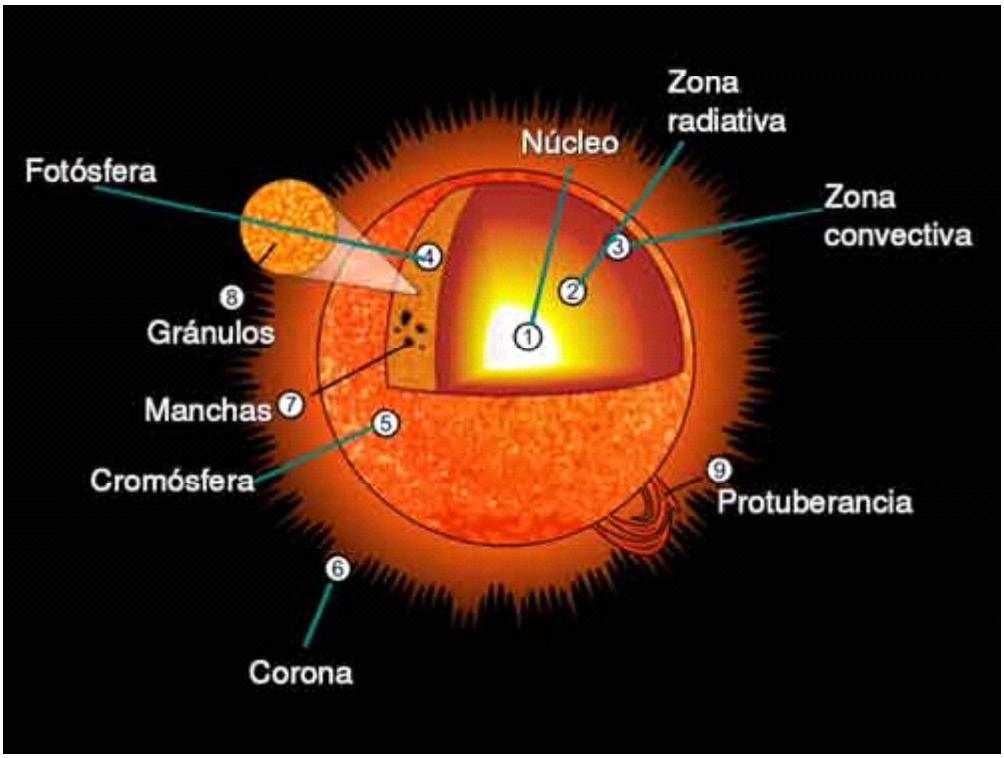

Figura 01.jpg – Estructura del Sol. Figura original de la página Web http://en.wikipedia.org/wiki/Sun.

Zona radiativa

La zona radiativa es la región que se extiende de 0.25 a 0.7 radios solares. Su nombre se debe a que en ésta la energía se transmite completamente por radiación, entonces no hay convección del gas. En la zona radiativa la temperatura decrece hacia afuera de 7.000.000 a 2.000.000 K y densidad de 20 a 2 gcm^{-3}.

Zona convectiva

Es la zona que se extiende desde 0.7 radios solares hasta la superficie del Sol. A diferencia de la zona radiativa, el transporte de energía en la zona convectiva sucede mayormente a través de la convección. En ella se forman grandes columnas de gas moviéndose hacia la superficie y otra vez de regreso hacia el interior del Sol, que dejan su firma en la fotósfera en forma de granulación y supergranulación solar. La densidad en la capa más externa de la zona es de 0.2 gm^{-3} o una 1/10.000 parte de la densidad del aire al nivel del mar.

Superficie solar – fotósfera

La fotósfera es la capa que vemos siempre cuando miramos el Sol a simple vista o a través de los telescopios ópticos. Aunque le decimos superficie solar, la fotósfera no es sólida sino que es una capa de gas de 100 km de grosor. Su temperatura es de 5800 K por lo cual el Sol tiene un color amarillo. Debido a su color los astrónomos clasifican al Sol como una estrella del tipo G2. La fotósfera es la capa más fría de nuestra estrella ya que las capas atmosféricas (cromósfera, corona) tienen temperaturas mucho más altas. Muchos fenómenos muy interesantes suceden en la fotósfera, como manchas solares, fáculas y gránulos.

© Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

10 de octubre 2009 • Volumen 10 Número 10 • ISSN: 1067-6079

Manchas solares, gránulos y fáculas

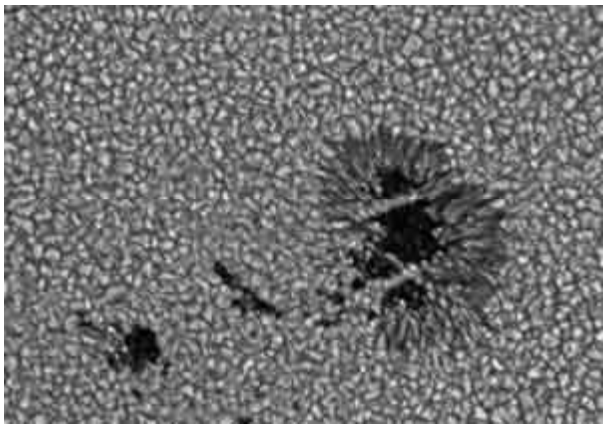

Figura 09. Gránulos en la superficie solar y mancha solar. (http://solarscience.msfc.nasa.gov/feature1.shtml). Las películas en (http://www3.kis.uni-freiburg.de/~pnb/granmovtext1.html).

Las manchas solares son probablemente el fenómeno solar más conocido debido a que se pueden observar con los telescopios pequeños o a veces incluso a simple vista. Según el Libro de Han (terminado en el año 111 DC) que cubre la historia de la antigua China durante los años 206 AEC hasta 25 AC, los astrónomos chinos observaron un grupo de manchas solares en el año 28 AC debido a que el polvo levantado por el viento de los desiertos cercanos actuó como un filtro, disminuyendo el brillo del Sol. Más observaciones de manchas solares se reportaron en los años 813 y 1129 DC. Los astrónomos Thomas Harriot, Johannes y David Fabricius y Christoph Scheiner fueron los primeros en observar las manchas solares a través de sus telescopios en los años 1610 y 1611. En 1612, Galileo Galilei mejoró mucho estas observaciones siendo más sistemático que los demás en elaborar un registro de sus observaciones.

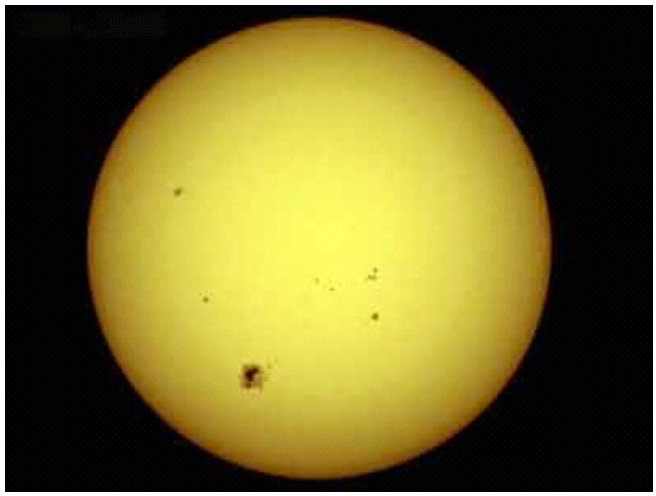

Figura 02. Manchas solares en la superficie solar observadas por SOHO en octubre del 2003 (http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/images/mdi20031028.html)

Debido a estas primeras observaciones se estableció que el Sol rota y que esta rotación no es uniforme sino que las partes más cercanas a su ecuador rotan más rápido (28 días) que las regiones polares (hasta

© Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

35 días). El número de manchas solares en la superficie solar no es constante sino que cambia con un período de aproximadamente 11 años. Los períodos con muchas manchas aparecen cuando el Sol está muy activo, mientras que durante la baja actividad solar hay veces que no se observa ninguna mancha solar. Las manchas solares aparecen en regiones donde el campo magnético es especialmente fuerte, por debajo de las llamadas regiones activas. Las manchas son áreas en la superficie solar con menos brillo que el resto del Sol. Están compuestas de una parte central llamada umbra, cuya temperatura es de 4000 K, y su brillo es solamente 30 % del brillo de la fotósfera. La umbra está rodeada por la penumbra que brilla con una intensidad de 70 % del resto del Sol y donde la temperatura alcanza "solamente" 5000 K. Las manchas realmente no son negras, nosotros las percibimos así debido al contraste que hacen con el resto de la fotósfera. Los tamaños de las manchas solares pueden alcanzar más de varias decenas de miles de kilómetros, es decir, que son mucho más grandes que la Tierra. Pueden aparecer en pares o en grupos de muchas manchas pequeñas. Las manchas constituyen las bases de algunas de las enormes erupciones del Sol.

Los gránulos solares son consecuencia de la convección en la zona convectiva. En la fotósfera el plasma caliente deja de subir y regresa al interior solar causando que toda la fotósfera aparezca cubierta de gránulos. En los centros de los gránulos el plasma sube y por eso son las partes más calientes y más brillantes. Los bordes de los gránulos son lugares menos calientes, donde el plasma regresa al interior solar. Los gránulos tienen tamaños típicos de alrededor de 1000 km y duran entre 8 y 20 minutos.

Las fáculas son regiones brillantes en la fotósfera solar que se forman entre los gránulos solares y son producidas debido a las concentraciones del campo magnético.

Cromósfera

La atmósfera solar está formada por dos capas llamadas cromósfera y corona que se encuentran encima de la fotósfera. En la cromósfera la temperatura sube a 20.000 K. Fue observada por primer vez durante los eclipses solares totales. El período durante el cual se puede observar a la cromósfera cuando hay un eclipse solo dura algunos segundos. La cromósfera es una capa muy activa. En ella se pueden observar fenómenos como espiculas, protuberancias y filamentos.

Espículas, Protuberancias y filamentos

La cromósfera está completamente cubierta de espículas, estructuras picudas típicamente de 10.000 km de largo y 1000 km de ancho. Las espículas se mueven hacia arriba con una velocidad típica de 20 km/s y duran de 5 a 10 minutos.

© Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

10 de octubre 2009 • Volumen 10 Número 10 • ISSN: 1067-6079

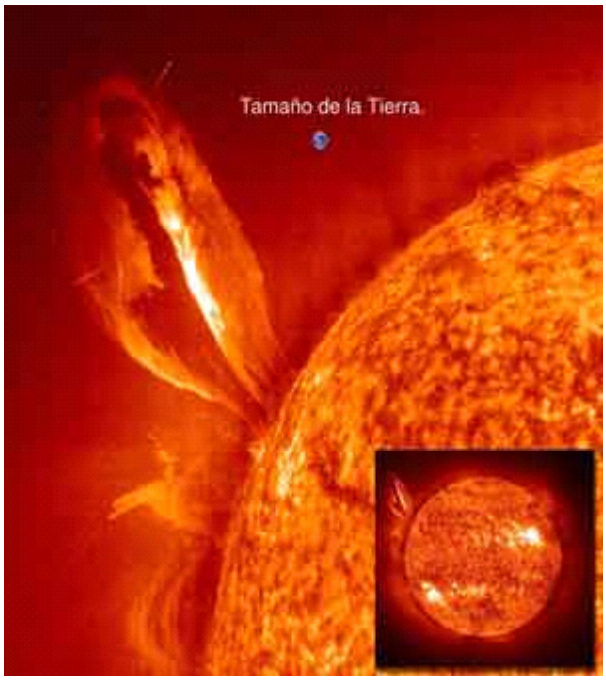

Figura 03. Protuberancia y el tamaño de la Tierra. (http://www.liverpoolmuseums.org.uk/wml/spaceandtime/planetarium/solar-system/sun.aspx).

Las protuberancias o filamentos son unas estructuras enormes que se extienden desde la fotósfera hasta la corona y cuya composición química es igual a la de la cromósfera. Los dos términos se utilizan para describir el mismo fenómeno observado desde diferente ángulo. El término protuberancia se usa cuando estas estructuras se observan en el borde del Sol, muchas veces en forma de arcos. Los filamentos se observan sobre la superficie solar como estructuras largas y delgadas más oscuras que el fondo. Sus tamaños pueden ser más de 30 veces el tamaño de la Tierra.

Corona

© Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

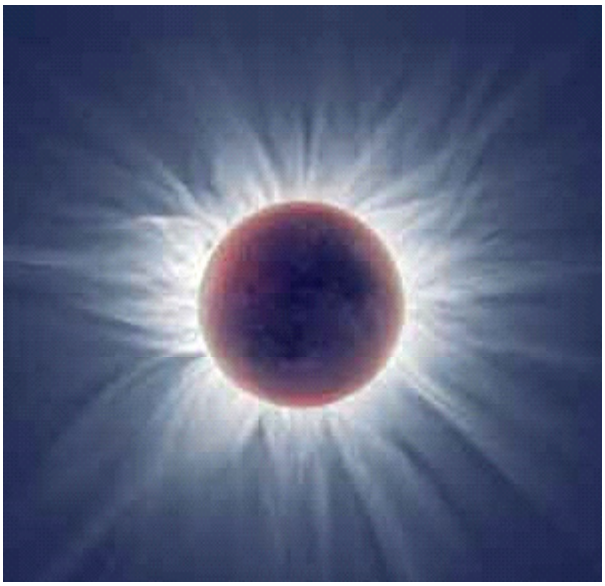

Figura 04. Eclipse del Sol total durante un máximo solar. Se observa la corona con muchos cascos coronales que rodean al Sol (http://stereo.gsfc.nasa.gov/classroom/eclipse.shtml).

La corona es la capa externa de la atmósfera solar. Usualmente no la podemos observar a simple vista debido a que la luz de la fotósfera es mucho más fuerte que la que emite la corona. Las ocasiones en las que sí podemos ver a la corona de manera natural son muy escasas. Esto sucede durante eclipses solares totales. Entonces aparece la corona en luz blanca rodeando al Sol. En luz blanca la corona esta formada por estructuras llamadas cascos coronales que se extienden radialmente fuera del Sol. Actualmente existen instrumentos llamados coronógrafos que tapan el disco solar produciendo un eclipse artificial, por lo que podemos observar a la corona en luz blanca de forma continua. La intensidad de la corona, su tamaño y forma dependen mucho de la actividad solar. Durante el mínimo solar, la corona se concentra más en las regiones ecuatoriales del Sol. Durante el máximo solar, la corona es distribuida uniformemente en todas las latitudes solares. Esto se debe principalmente a la forma del campo magnético solar en un momento dado. En el mínimo el campo tiene forma de un dipolo, mientras que durante el máximo aparecen muchos dipolos pequeños cubriendo toda la superficie solar. La temperatura de la corona es muy alta, llega a ser hasta un millón de K. Por esto la corona emite también luz ultravioleta extrema y rayos X. Para observar a la corona en estas longitudes, es necesario estar fuera de la Tierra, ya que la atmósfera de nuestro planeta no permite la entrada de esta radiación. Observaciones de la corona en rayos X durante el mínimo muestran que las regiones cercanas a los polos no emiten. Estas regiones son conocidas como hoyos coronales polares.

Hasta la fecha, no se ha encontrado una respuesta completamente satisfactoria sobre porque la temperatura de la corona es tan alta. Se piensa que las ondas magnetoacústicas originarias en las capas internas a la corona se disipan en ella dándole su energía. La otra hipótesis propone que las explosiones como ráfagas y micro-ráfagas calientan la corona. Los fenómenos más espectaculares en la corona son los ráfagas, los arcos post-ráfagas, las protuberancias, los hoyos coronales, las plumas polares y las eyecciones de masa coronal (EMC).

Ráfagas, Arcos y Cascos coronales, Plumas polares

© Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

10 de octubre 2009 • Volumen 10 Número 10 • ISSN: 1067-6079

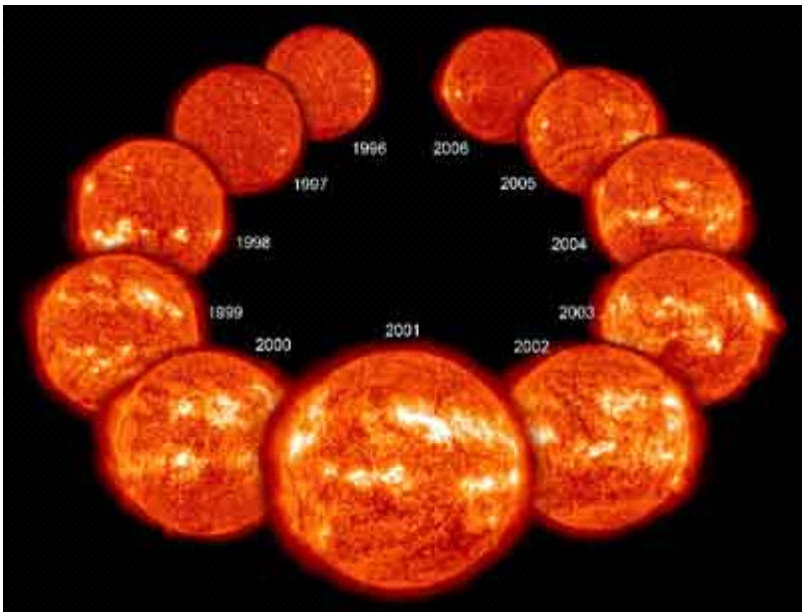

Figura 05. El Sol en luz ultravioleta durante todo el ciclo solar. Imágenes obtenidas por SOHO (http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/images/cycle002.html).

Las ráfagas solares son enormes explosiones en el Sol (las más grandes en el Sistema Solar) que se extienden desde la fotósfera hasta la corona. En ellas el plasma se calienta hasta varias decenas de millones de K. Las ráfagas emiten luz en todas las longitudes de onda, desde infrarrojo hasta los rayos gamma. A veces las ráfagas están relacionadas con las eyecciones de masa coronales.

Los arcos coronales se encuentran encima de las manchas solares y las regiones activas. Son regiones relacionadas con campos magnéticos cerrados que conectan regiones magnéticas en el Sol. Usualmente son estructuras que cambian su aspecto rápidamente, aunque a veces pueden permanecer durante días o incluso semanas. El gas que contienen es más denso que el de sus alrededores.

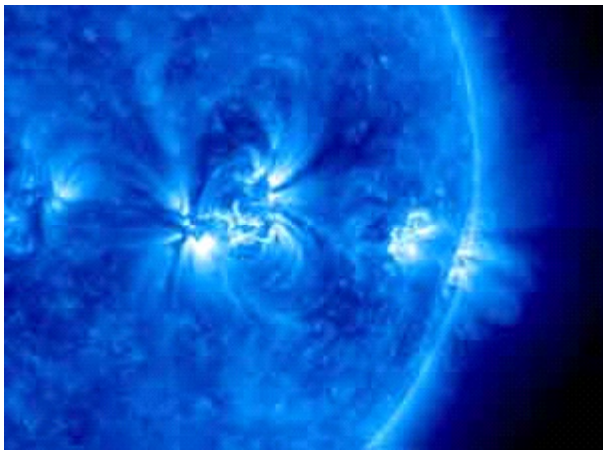

Figura 06. Arcos coronales observados con la nave Stereo en junio del 2007. (http://stereo.gsfc.nasa.gov/img/stereoimages/preview/LoopingArcs060907.jpg)

El nombre casco coronal se dio a las estructuras que aparecen en la corona, cuya forma es parecida a la de los cascos del ejercito alemán durante la primera guerra mundial. Sus picos usualmente están sobrepuestos sobre las regiones con las manchas solares y regiones activas (ver Figura 4). Los picos delgados se forman debido a que el viento solar se aleja del Sol en los espacios entre los cascos.

© Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

Las plumas son estructuras asociadas con las líneas de campo magnético abiertas en los polos solares. Son flujos delgados de plasma donde el material se está alejando del Sol.

Eyecciones de masa coronal

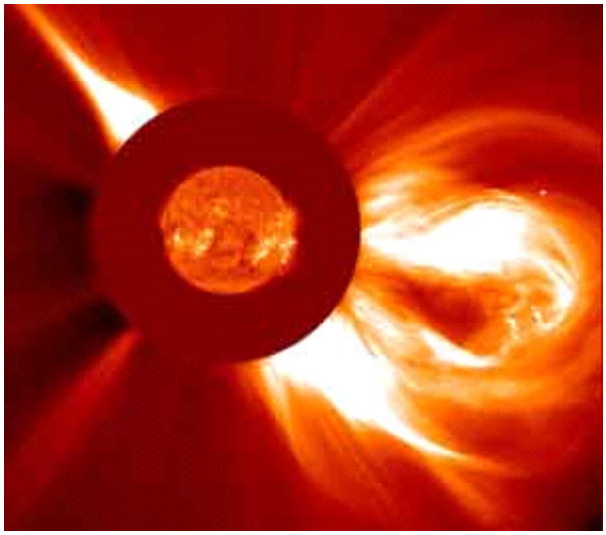

Figura 07. Eyección de masa coronal (http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/images/20031202c2eit304.html)

Las eyecciones de masa coronal (EMC) son enormes burbujas de material que sale de la corona solar. El material es plasma y principalmente consiste de protones y electrones. La mayoría de las EMCs proviene de las regiones activas con campos magnéticos cerrados. La velocidad de las EMCs puede ser entre 20 y 3200 km/s, aunque en promedio es de aproximadamente 500 km/s. Durante el máximo solar se pueden observar hasta 6 EMCs por día, mientras que durante el mínimo el promedio es unas cuantas por año. Las EMCs se propagan por el espacio interplanetario. Si llegan hasta la Tierra pueden causar muchos fenómenos – auroras borealis muy intensas, tormentas geomagnéticas (ver sección magnetósfera), el malfuncionamiento de los satélites e incluso pueden interferir seriamente con nuestras instalaciones eléctricas. En 1989 debido a una EMC casi toda la provincia de Quebec se quedó sin luz y se observaron auroras hasta en Texas.

Observatorios solares

Actualmente existe un interés especial para entender al Sol. Existen diferentes misiones espaciales que observan al Sol de manera continua en diferentes longitudes de onda. A continuación describiremos a las más importantes.

Algunas misiones se dedican a observar el Sol tomando imágenes de él en varias longitudes de onda. Entre ellas las que más destacan son Hinode, SOHO y STEREO. Por otro lado, hay misiones que aparte del Sol también se dedican a observar el viento solar *in situ*. Entre éstas las más importantes son STEREO, Wind, ACE. Las misiones Wind y ACE monitorean de forma continua las características del viento solar afuera de la magnetosfera terrestre y forman parte de la red de alarma mundial de clima espacial. Cuando una EMC sale del Sol son detectadas por los coronógrafos de STEREO o SOHO y las naves que están cerca de la Tierra como Wind y ACE se preparan para monitorear cambios cerca de la magnetosfera debido al paso de la EMC.

© Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

10 de octubre 2009 • Volumen 10 Número 10 • ISSN: 1067-6079

Hinode

La nave Hinode es una colaboración de las agencias espaciales japonesa, estadounidense y de Gran Bretaña. Fue lanzada en septiembre de 2006. Hinode (significa "amanecer" en japones) anteriormente fue conocido como Solar-B. La misión está diseñada para observar al Sol en longitudes de onda ópticas, en extremo ultravioleta y en rayos X. La misión consiste de varios instrumentos científicos. Los objetivos principales de Hinode son: (i) entender como la energía generada por los cambios del campo magnético es transmitida a la corona, (ii) como esa energía influye en la dinámica y estructura de las capas externas de la atmósfera solar y (iii) determinar cómo el transporte de energía y la dinámica atmosférica afectan el espacio interplanetario. Los instrumentos a bordo de Hinode incluyen Telescopio Óptico Solar, Spectrómetro en Extrema Ultravioleta y Telescopio en Rayos X.

Solar Terrestrial Relations Observatory (STEREO)

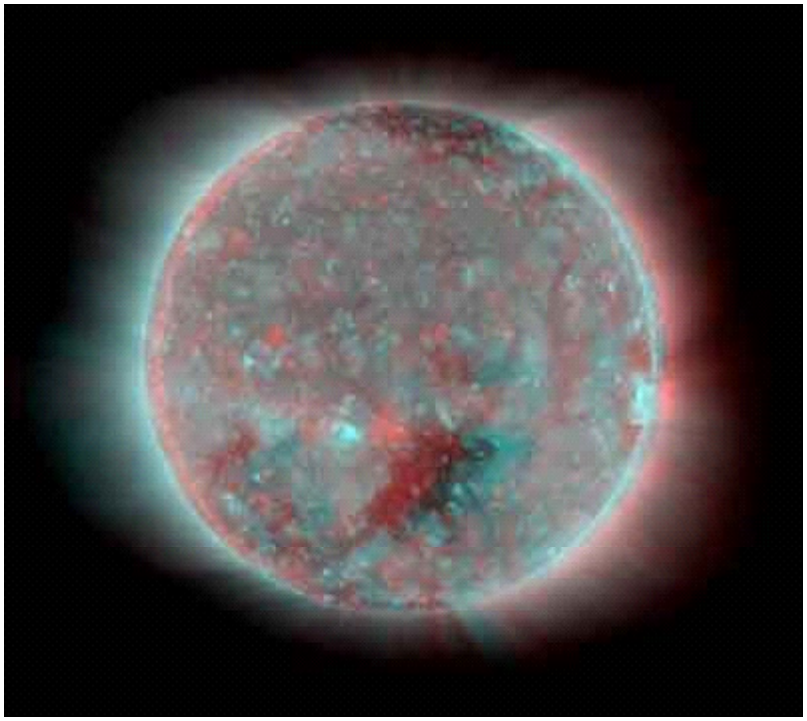

Figura 08. Imagen del Sol en 3D con Stereo. (http://stereo.gsfc.nasa.gov/gallery/item.php?gid=1&id=57)

La misión STEREO fue lanzada en octubre del 2006. Consiste de dos naves idénticas que orbitan alrededor del Sol a la distancia de la Tierra. Las dos naves obtienen imágenes estereoscópicas del Sol y de los fenómenos solares. Una de las naves orbita el Sol adelante de la Tierra (A) y otra detrás de ella (B). Al igual que Hinode, STEREO tiene varios instrumentos con los que se observa al Sol en varias longitudes de onda.

Solar and Heliospheric Observatory – SOHO

SOHO fue lanzada en Diciembre de 1995. Se trata de una colaboración entre la Agencia Espacial Europea (ESA) y la NASA. SOHO está girando alrededor de nuestra estrella a una u.a. y contiene muchos instrumentos que observan el Sol en luz ultravioleta y luz visible. Los instrumentos obtienen imágenes directas y también los espectros del Sol y la corona. Las más conocidas son las imágenes del Sol hechas con los coronógrafos, que tapan partes del Sol creando así eclipses solares artificiales, permitiéndole a SOHO observar diferentes capas de la corona y las eyecciones de masa coronales. El SOHO también ha descubierto más de 1500

© Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

cometas.

Transition Region and Coronal Explore - TRACE

TRACE es otra misión de la NASA dedicada a estudiar al Sol. Fue lanzada en abril del 1998. Sus objetivos son investigar la conexión entre los campos magnéticos en escalas pequeñas con las estructuras de plasma asociadas. Trace está obteniendo imágenes de la fotósfera, la región de transición y la corona de muy alta resolución con un segundo de arco casi simultáneamente. Su campo de visión es de 8.5 x 8.5 minutos de arco.

El Viento que viene del Sol

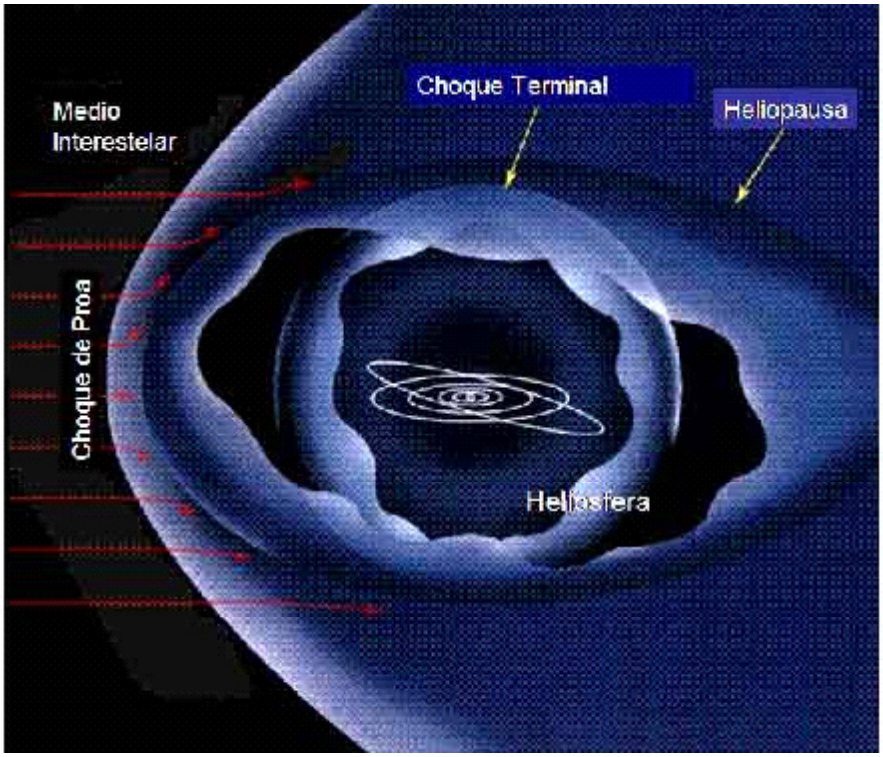

Figura10. Heliósfera (http://helios.gsfc.nasa.gov/heliosphere.html, http://helios.gsfc.nasa.gov/heliosphere.html)

Como ya se mencionó anteriormente, aun no entendemos bien porque la corona solar es tan caliente con temperaturas de más de un millón de grados. Lo que sí sabemos, es que debido a esta temperatura tan alta, el plasma coronal no puede ser contenido por la fuerza gravitacional del Sol, por lo que la corona se expande más allá de la órbita de Plutón formando un viento muy veloz conocido como viento solar. La existencia de este viento fue propuesta teóricamente por Eugene Parker en 1959 y confirmada observacionalmente un par de años después por las naves Lunik y Mariner 2. El viento solar esta formado en su mayoría por protones y electrones con una pequeña componente de núcleos de helio (4%) y algunos elementos más pesados (1%) como carbono, nitrógeno, oxígeno, neón, magnesio, silicón y hierro. El viento solar se mueve con velocidades entre 300 y 1200 km/s (las velocidades del viento en los huracanes en la tierra alcanzan algunos cientos de kilómetros por hora, lo cual es varias miles de veces menor que la velocidad del viento solar.). Esto es más rápido que la velocidad de sonido local, por lo cual decimos que el viento solar es supersónico. El viento solar viaja por todo el Sistema Solar formando una región alrededor de nuestra estrella y de los planetas conocida como heliósfera. Debido al movimiento relativo de la heliósfera con respecto al medio interestelar, su forma

© Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

10 de octubre 2009 • Volumen 10 Número 10 • ISSN: 1067-6079

es achatada en el frente y alargada por detrás, de manera similar a un cometa (ver Figuras 10). La región donde termina la heliósfera se llama heliopausa, ésta se encuentra a una distancia del Sol de 100 u.a., lo cual es mucho más allá de la órbita de Pluton (40 u.a.). Una característica muy importante del viento solar es que tiene una conductividad eléctrica muy alta y esto le permite arrastrar consigo al campo magnético de la corona, por lo que el medio interplanetario está permeado por plasma y por campo magnético de origen solar. La magnitud de este campo a la altura de la órbita de la Tierra es de 6 nanoTeslas.

El descubrimiento del viento solar constituyó un parte aguas en el estudio del Sistema Solar, ya que puso de manifiesto la importancia de los campos electromagnéticos en el espacio y la existencia de interesantes fenómenos que ocurren cuando el viento interacciona con los campos magnéticos de los planetas o con sus ionosferas. El viento solar es un laboratorio natural para estudiar plasmas espaciales. Debido a su cercanía es posible estudiarlo directamente con satélites en el espacio. El 99% de la materia en el universo se encuentra en estado de plasma, por lo que al estudiar fenómenos que ocurren en el viento solar, estamos aprendiendo sobre procesos que ocurren en otros entornos astrofísicos, como sistemas planetarios distantes, estrellas, nebulosas, etc.

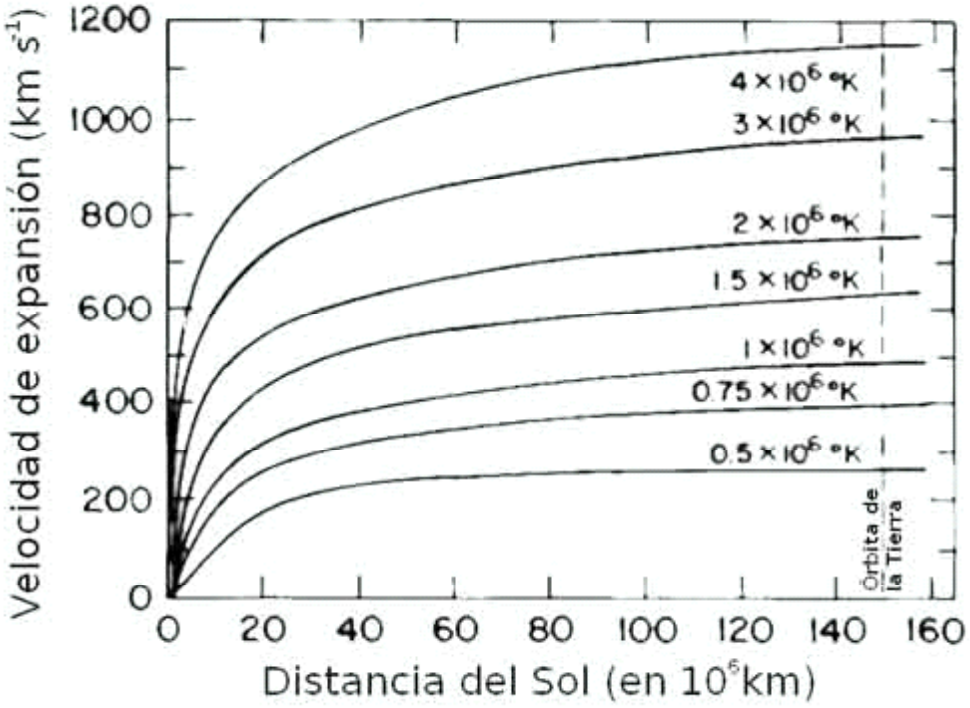

Figura 11. Velocidad del viento solar, modelo hidrodinámico de Parker (Parker, E. N., "Interplanetary dynamical processes", 1963, New York, Interscience Publishers).

La velocidad del viento empieza siendo muy baja y aumenta conforme se aleja del Sol hasta alcanzar una velocidad terminal que conserva por el resto de su viaje por la heliosfera (ver Figura 10). La magnitud de la velocidad terminal del viento solar depende de la temperatura de la corona (a mayor temperatura, mayor velocidad). En la Figura 11 se muestra la variación de la velocidad con la distancia al Sol (r) para una temperatura coronal de un millón de grados de acuerdo al modelo hidrodinámico de Parker para el viento solar. A diferencia de la velocidad, la temperatura y la densidad del viento que viene del Sol disminuyen al alejarse de éste. La temperatura decae muy lentamente, más lentamente que 1/r, y la densidad disminuye como $1/r^2$, ya que se trata de una expansión esférica. A la altura de la órbita de la Tierra, la temperatura del viento solar varía entre casi un millón y algunas decenas de miles de K, y la densidad entre 3 y 11 partículas por centímetro cúbico, por lo que el viento esta muy enrarecido. Las observaciones *in situ* del viento solar han mostrado que existen esencialmente dos tipos de viento: un **viento rápido** con velocidades entre 500 y

© Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

750 km/s, de alta temperatura y baja densidad; un **viento lento** con velocidades entre 250 y 400 km/s, más denso y más frío. Además de estas dos corrientes de viento, existen parcelas transitorias de viento diferente a los anteriores, emitidas en eventos de actividad solar, conocidas como eyecciones de masa corona o EMC. Como veremos posteriormente, estas EMC forman gigantescas burbujas de material que pueden golpear a la magnetosfera terrestre perturbando el entorno de nuestro planeta. Además, algunas de estas EMC son muy veloces con velocidades de hasta 3200 km/seg y pueden generar ondas de choque transitorias en el medio interplanetario, similares a la onda que se genera delante de un avión supersónico como el Concord.

Corazas magnéticas

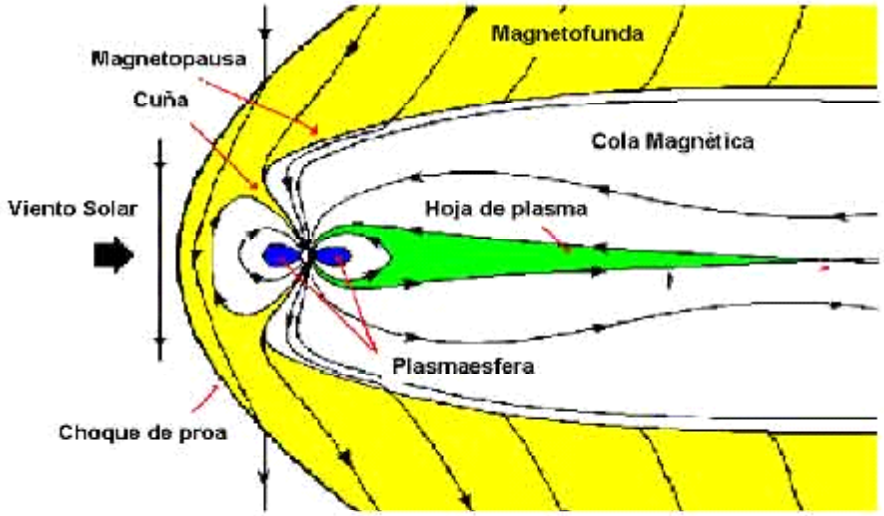

Figura 12. Esquema de la magnetósfera terrestre (http://helios.gsfc.nasa.gov/magnet.html).

La interacción del viento solar con el campo magnético de la Tierra crea una región llamada magnetósfera (ver Figura 12). Esta magnetósfera forma una coraza magnética alrededor de nuestro planeta y nos protege de la llegada directa de partículas solares. En el Sistema Solar todos los planetas, salvo Venus y Marte, tienen un campo magnético y una magnetósfera. En el caso de Venus y Marte el viento solar interactúa con la ionosfera de los planetas. La forma de las magnetosferas es asimétrica debido a la compresión que sufre el campo magnético al interactuar con el viento solar del *lado dia*. En el lado opuesto, el *lado noche,* las líneas de campo se estiran alejándose del Sol, formando una cola como la de los cometas (Figura 12). Dentro de las magnetósferas el campo magnético planetario domina la dinámica de las partículas cargadas. La magnetosfera de la Tierra es la que más se ha explorado y la que entendemos mejor. Nuestra coraza magnética nos protege de la llegada directa de partículas solares, por lo que dentro de ella la mayor parte del material proviene de la ionosfera. Está delimitada por una frontera llamada "magnetopausa" que separa al viento solar del campo planetario. La magnetopausa del lado día está a unos 10 radios terrestres (1 R_T = 6 400 km), en el lugar donde la presión del dipolo magnético terrestre se equilibra con la presión dinámica del viento solar. Sin embargo, la llegada de una eyección de masa coronal (i.e. una inmensa nube de material de la corona solar que viaja con velocidades de varios cientos de kilómetros por segundo) puede comprimir a la magnetosfera acercando a la magnetopausa hasta 5 R_T.

© Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

10 de octubre 2009 • Volumen 10 Número 10 • ISSN: 1067-6079

La velocidad del viento solar es tan alta (> 300 km/s), que supera la velocidad de las ondas que se transmiten en él. Esto hace que cuando el viento solar encuentra al campo magnético terrestre, se generen ondas en el plasma que tratan de propagarse en todas direcciones. Las ondas que tratan de propagarse hacia el Sol no pueden hacerlo, sino que son arrastradas por el viento mismo y se genera una "onda de choque", en donde las propiedades del plasma cambian bruscamente (ver Figura 12). Esta onda de choque es similar al efecto de choque de proa delante de un barco, debido a que éste viaja con una velocidad mayor a la de las ondas en el agua. El plasma que atraviesa el choque es calentado, comprimido, y desacelerado llenando una región conocida como "magnetofunda". El viento solar que rodea a la magnetosfera es plasma caliente de la magnetofunda.

El interior de la magnetosfera esta dividido en varias regiones (ver Figura 12). La "plasmaesfera" es la porción del plasma magnetosférico que rota con la Tierra; en su interior están los "cinturones de Van Allen". La "hoja de plasma" separa en dos partes a la cola magnetosférica; en una de estas regiones las líneas de campo magnético apuntan hacia la Tierra, mientras que en la otra se alejan de ella. La cola magnetosférica se extiende a más de 1000 R_T.

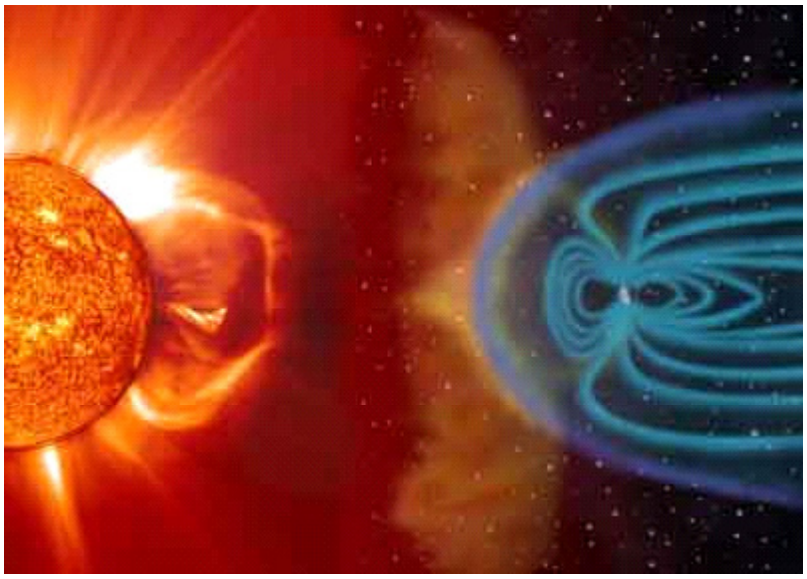

Figura 13. Interacción de una EMC con la magnetosfera terrestre (http://www.physics.unlv.edu/~jeffery/astro/sun/sun.tml).

La magnetosfera sufre alteraciones provocadas por la actividad solar. Algunas eyecciones de masa coronal (EMC) pueden perturbar fuertemente a todo el "entorno geomagnético". En algunas ocasiones, el campo magnetosférico interactúa con el campo magnético del viento solar o de una EMC mediante un proceso llamado "reconección magnética", y nuestra coraza magnética queda abierta temporalmente permitiendo la entrada de plasma solar. Para que esto suceda el campo magnético en el medio interplanetario debe tener una dirección adecuada para conectarse con el campo terrestre. En las regiones aurorales, las partículas se precipitan sobre la atmósfera, guiadas por las líneas de campo, dando lugar a las espectaculares "auroras". A latitudes más bajas, las partículas solares no pueden penetrar cerca de la Tierra, pues son capturadas en las líneas del campo magnético que en estas regiones son muy horizontales. Las partículas capturadas giran alrededor de nuestro planeta, enriqueciendo la corriente anular, lo cual induce un campo magnético que altera considerablemente al campo ambiente en la magnetosfera y al medido en la superficie terrestre. Esta perturbación, que se precipita en algunas horas y tarda varios días en disiparse, es conocida como "tormenta geomagnética". Durante una tormenta geomagnética intensa, los aparatos, tanto de navegación como de exploración, que se orientan con el campo geomagnético dejan de ser de utilidad y las variaciones del campo magnético inducen corrientes eléctricas en toda la atmósfera e incluso en el subsuelo. El calor disipado por estas corrientes puede dañar instalaciones eléctricas y estructuras metálicas. El estudio de todas las

© Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

alteraciones que sufre la región cercana a la Tierra es lo que se conoce como “clima espacial”.

Las misiones Cluster y Themis miden constantemente al campo magnético y al plasma dentro de la región de interacción del viento solar con la Tierra. Tienen orbitas muy elípticas que cubren desde el antechoque hasta la magnetocola.

Las magnetósferas de los otros planetas del Sistema Solar son parecidas a la terrestre en términos generales, pero cada una tiene también características particulares. En las magnetosferas de los planetas gigantes como Júpiter y Saturno suceden fenómenos muy interesantes debido a la presencia de lunas como Io y Encelado que arrojan material a la magnetosfera. En otro texto abordaremos estas magnetósferas en detalle.

Aun no sabemos el tamaño exacto de la heliósfera en la dirección contraria al movimiento del Sol en la galaxia. La nave Voyager cruzó recientemente el choque terminal a una distancia de 94 unidades astronómicas. Este choque forma parte de la región de transición entre el viento solar y el medio interestelar y en él, el viento solar es desacelerado, desviado y calentado.

Ciencias Espaciales en la UNAM

Estudiar los fenómenos que ocurren en el Sol y el viento solar es fascinante y aún queda mucho por entender sobre nuestra estrella y su entorno. El desarrollo tecnológico de los últimos 50 años ha permitido estudiar con mucho más detalle que nunca antes fenómenos solares con el uso de naves en el espacio que pueden ver al Sol en longitudes de onda que no son visibles desde la Tierra. Todos los días tenemos registros de la actividad solar y el viento solar es un laboratorio natural para estudiar procesos físicos en plasmas. El entender al Sol y al viento solar nos permite conocer más sobre estrellas lejanas, las cuales están formadas por plasmas similares a nuestra estrella.

En el departamento de Ciencias Espaciales del Instituto de Geofísica se realiza investigación sobre los temas que hemos descrito en este artículo. Se estudia al Sol, al medio interplanetario, a las EMC que viajan en el viento, a las regiones de interacción del viento con magnetosferas, a las magnetosferas y al choque terminal. También se estudian a los rayos cósmicos y las llamadas relaciones Sol-Tierra. Para llevar a cabo estos estudios, se utilizan datos observados diversas misiones espaciales como las arriba descritas y se cuenta también con observatorios propios como el Observatorio de Centelleo Interplanetario (MEXART) en Coeneo, Michoacán , el Detector de Rayos Cósmicos y el Radiointerferometro Solar RIS ambos en Ciudad Universitaria y el Observatorio Solar Mexicano de Gran Altura (OSOMEGA), que se encuentra en desarrollo en la Sierra Negra, Puebla. Gran parte del trabajo que se realiza incluye el desarrollo de proyectos doctorales y colaboraciones con científicos de otros países.

Referencias

Wikipedia sobre el Sol:

http://en.wikipedia.org/wiki/Sun

http://en.wikipedia.org/wiki/Sunspots

Sol en Nasa:

http://solarscience.msfc.nasa.gov/

http://solarscience.msfc.nasa.gov/whysolar.shtml

Soho:

© Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.

10 de octubre 2009 • Volumen 10 Número 10 • ISSN: 1067-6079

© Coordinación de Publicaciones Digitales. DGSCA-UNAM
Se autoriza la reproducción total o parcial de este artículo, siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.